正常老化对视觉早期注意的影响——来自 ERP 的证据 *

叶丽群[1] 谭 欣[1] 姚 堃[1] 丁玉珑[1]

（华南师范大学心理学院, 广州 510631）

摘 要 选择性注意能够作用于视觉信息加工的不同阶段。各个注意阶段均受到老化过程的影响，其中注意早期阶段的老化研究对于理解认知老化的发生机制有重要意义。本文系统地梳理了刺激前的注意预期阶段以及刺激后 200ms 内的早期感知注意阶段的正常老年人和青年人 ERP 比较研究，以探讨正常老化对视觉早期注意的影响。现有证据表明，相对于青年人，正常老年人：（1）多个早期 ERP 注意效应（包括注意预期 ADAN，早期空间注意 N1，以及特征注意 SP 和 SN）在潜伏期上都存在显著延迟；（2）在振幅上，不同 ERP 注意效应的老化表现存在差异：某些 ERP 成分（包括注意预期 EDAN，以及早期空间注意 P1）的注意效应没有明显减弱，而某些 ERP 成分（包括注意预期 alpha，早期空间注意 N1，以及特征注意 SN）的注意效应受到老化调控；（3）一些注意效应（包括特征注意 SP 成分，以及客体注意 P1 和 N1 成分）的目标增强机制保留，而干扰抑制机制缺损。目前已有研究在老化对注意效应振幅的调控上还存在不一致，这可能与研究的信噪比、任务难度、注意机制分离以及老年人的个体差异有关。未来研究应考虑这些因素以更好地探究正常老化对视觉早期注意的影响。

关键词 视觉早期注意，正常老化，注意预期，ERP

分类号 B842

1 前言

现实环境充斥着大量的视觉信息，而个体大脑信息加工能力有限，因此人们需要通过视觉选择性注意(visual selective attention)对进入大脑加工的信息进行筛选，从而提高信息加工的效率。从时间进程来看，选择性注意能够作用于一系列的信息加工过程，包括刺激前预期

收稿日期：2021-09-29

* 国家自然科学基金项目(31970985，31471070)，广东特支计划百千万工程领军人才项目(201626026)。

通讯作者：丁玉珑，E-mail: dingyulong@m.scnu.edu.cn

(Di Russo, Berchicci, Bianco, Mussini, et al., 2021；综述见 Klimesch, 2012)、刺激感觉加工(综述见 Eimer, 2014; Mangun & Hillyard, 1991)、从工作记忆中选择信息(Feldmann & Vogel, 2018; Gaspar et al., 2016; Oberauer, 2019)、语义加工(综述见 Luck & Kappenman, 2012; Serences & Kastner, 2014)以及控制运动反应(综述见 Luck & Kappenman, 2012)等。

注意机制会随着正常老化过程而发生变化。正常老化是指老年人的认知能力受老化的影响尚未达到患病程度，即综合认知能力高于轻度认知障碍(mild cognitive impairment, MCI)的诊断标准（若无特指，后文中的老化均指正常老化）。注意老化的行为研究表明，老年人相比青年人（18~35 岁）在注意任务中表现普遍变慢（综述见 Madden & Monge, 2019）。注意老化的 fMRI(functional Magnetic Resonance Imaging)研究发现，老年人在注意任务中额顶背侧区域激活增强，并伴随着后部感觉区域激活减弱(Allen & Payne, 2012; Geerligs et al., 2014; Madden et al., 2007)，这提示老年人存在前额顶区的补偿性激活机制。关于 fMRI 功能连接的老化研究发现，老年人大脑功能模块内连通性减弱，而模块间的连通性增强(综述见 Grady, 2017)，因此大脑网络的整体模块化程度（即大脑网络划分为局部模块的程度）随老化而减弱(综述见 Madden & Monge, 2019)。通过上述行为和 fMRI 研究结果，我们可以推断老年人整体加工速度延迟，且注意过程涉及的大脑激活区域以及各区域连接程度与青年人存在差异，但是由于行为研究和 fMRI 研究在时间分辨率上的局限性，这些研究无法清晰地揭示老化对注意过程各个阶段（特别是早期注意活动）的影响。

然而，“早期视觉注意的老化机制”是非常值得重视的研究问题。由于刺激前预期阶段与刺激后早期加工阶段联系紧密，我们认为早期注意包括刺激前预期注意过程以及刺激后 200ms 内的注意调控过程。早期注意是许多高级认知加工的必经阶段，与执行控制、记忆等对老化敏感的高级认知功能息息相关。而且相较于较晚期的注意阶段，早期的注意调控活动中混杂较少与反应相关的认知活动。我们可以从早期注意过程提取到更加纯粹的注意效应，从而更好地理解注意调控是否受老化影响，以及注意老化机制对后续认知过程的作用。

虽然前人已经做了许多行为、脑电以及 fMRI 研究，来探讨老化对选择性注意的影响，但是关注早期注意机制的老化研究比较零散，目前还没有相关综述从时间进程的角度对视觉注意老化机制的研究现状进行系统梳理。在已有的注意老化综述中，有研究者系统回顾了空间注意定向(综述见 Erel & Levy, 2016；综述见 Sciberras-Lim & Lambert, 2017) 和特征注意(综述见 Madden, 2007)等特定注意能力的老化研究。前人发现，老年人保持了较好的视觉空间注意定向能力(综述见 Sciberras-Lim & Lambert, 2017；综述见 Zanto & Gazzaley, 2017)，而

在特征注意和客体注意方面，对干扰信息的抑制控制能力有所衰退(Gazzaley et al., 2008; Haring et al., 2013; Schmitz et al., 2010; 综述见 Zanto & Gazzaley, 2017)。还有研究者综合了各种注意类型（如空间、特征和客体等）来探讨老化表现(综述见 Zanto & Gazzaley, 2014, 2017)，指出老年人的注意加工相对迟缓(Amenedo et al., 2012; Lorenzo-López et al., 2008)，并且注意机制的老化表现与任务难度有关(Wang et al., 2012)。

为了探索认知功能老化现象发生的源头，深入理解认知老化的发生机制，本文着眼于采用 ERP(event-related potential)技术的注意老化研究，从选择性注意加工的时间进程角度，对已有的视觉早期注意老化研究（包括刺激前预期阶段到刺激后早期加工阶段的注意过程）进行了梳理。为了更好地对比理解老年人和青年人的视觉早期注意 ERP 特点，本文还整理了涉及早期注意过程的经典研究范式及青年人经典 ERP 结果。最后，在梳理的研究结果基础上，本文总结分析了视觉早期注意老化的影响因素，对于深入理解注意老化机制有着重要的理论意义。

2 刺激前空间注意预期老化效应

2.1 空间注意预期的实验范式与神经指标

个体能够根据空间提示信息提前调控大脑活动来促进目标的加工。研究者通常使用内源性空间线索范式来探究这一机制。该范式包括两种类型：概率性空间线索范式（图 1A）和指示性空间线索范式（图 1B-D）(综述见 Foxe & Snyder, 2011)。二者共同点在于：两种线索都是出现在中央注视点位置，提示被试接下来注意某一侧视野。区别在于线索的有效性不同：当线索类型为概率性线索时，被试需要对视野双侧出现的刺激都作反应，提示侧不一定出现目标，线索有效性小于 100%（如图 1A 所示）。当线索类型为指示性线索时，被试只需要对提示侧所出现的刺激作反应，提示侧出现的一定是目标，线索有效性为 100%。指示性线索范式根据刺激是否会在非提示侧呈现还可以分为三种类型（如图 1B-D 所示）。

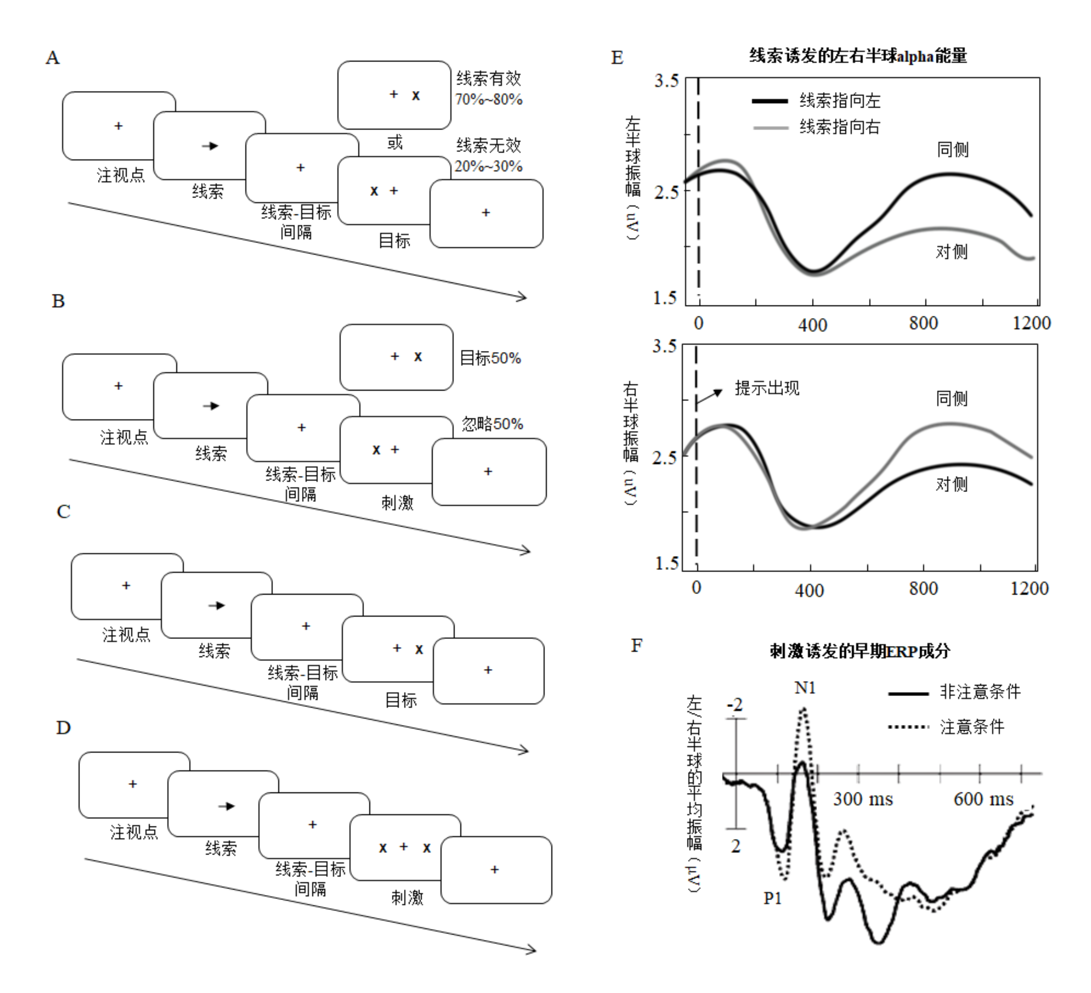


图 1 空间线索范式及青年人研究的经典结果。(A) 概率性空间线索范式，图中呈现了提示有效试次（目标大概率出现在提示侧，例如 70~80%）和提示无效试次（目标小概率出现非提示侧，例如 20~30%），被试要对随机出现在左视野或右视野的目标刺激进行反应；(B) 指示性空间线索范式 1，刺激等概率出现在线索提示侧或非提示侧。被试只对出现在提示侧的刺激进行反应，对出现在非提示侧的刺激不进行反应；(C)指示性空间线索范式 2，刺激只出现在线索提示侧，即只要刺激出现，被试都要对其进行反应；(D) 指示性空间线索范式 3，在提示与非提示侧同时都出现刺激，被试只需对提示侧的刺激反应，同时忽略非提示侧的刺激；(E) 注意预期 alpha 偏侧化的青年人经典结果，提示位置对侧半球的 alpha 活动能量比同侧更弱；资料来源：修改自 "Anticipatory biasing of visuospatial attention indexed by retinotopically specific α-bank electroencephalography increases over occipital cortex," by M. S. Worden, J. J. Foxe, N. Wang and G. V. Simpson, 2000, *Journal of Neuroscience*, *20*(6), p.3。(F) 内源性空间线索范式下的青年人经典 ERP 结果，图中波形为刺激诱发的 ERP 活动，注意条件下的 P1 和 N1 振幅比非注意条件更大。资料来源：修改自 "Modulations of sensory-evoked brain potentials indicate changes in perceptual processing during visual-spatial priming," by G. R. Mangun and S. A. Hillyard, 1991, *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *17*(4), p.1060。

采用上述范式的青年人研究发现，在线索-目标间隔阶段能够观测到线索诱发的大脑活动，这被认为反映了注意预期效应。该效应一方面表现在线索诱发的 ERP 活动上，包括（1）EDAN（early directing-attention negativity）成分，即在空间线索呈现后 200~300ms，在后部顶区出现线索指向位置的对侧半球比同侧半球更负的电活动，被认为反映了主动引导空间注意到预期位置的早期过程；（2）ADAN（anterior directing-attention negativity）成分，即在空间线索出现后 300~500ms，前部额区出现的线索指向位置的对侧半球比同侧半球更负的电活

动，被认为反映了主动引导空间注意到预期位置的晚期过程(Di Russo, Berchicci, Bianco, Perri, et al., 2021; 综述见 Eimer, 2014; Rasoulzadeh et al., 2021)。

另一方面，注意预期效应还会表现在线索诱发的枕区 alpha 振荡活动(α, 8~12Hz)上。如图 1E 所示，注意侧的对侧半球枕区 alpha 能量（alpha 振荡活动强度/振幅）比同侧半球枕区 alpha 能量更低(综述见 Foster & Awh, 2019; Worden et al., 2000)。已有青年人研究发现，alpha 偏侧化活动与线索有效性成正比(Gould et al., 2011)。在线索有效性为 100%的指示性线索范式中，被试不需要对非提示侧做反应，对被提示位置的空间注意分配更强。因此，为了得到更强的 alpha 偏侧化活动，大部分探究空间注意预期 alpha 能量偏侧化的老化研究都采用了指示性线索范式。

2.2 正常老化对空间注意预期 ERP 活动的影响

这种根据提示信息提前进行注意分配的能力在正常老化中能否保留？在中央线索诱发 EDAN 成分上，研究发现老年人潜伏期和振幅都与青年人没有显著差异 (Hong et al., 2015; Nagamatsu et al., 2011; Yamaguchi et al., 1995)。然而在中央线索诱发位于大脑前部脑区的 ADAN 成分上，正常老化对该成分的潜伏期和振幅均产生了影响。

一些研究表明，老年人 ADAN 的潜伏期(Hong et al., 2015)和振幅(Hong et al., 2015; Yamaguchi et al., 1995)与青年人都没有显著差异。但是也有研究发现，在潜伏期上，老年人的 ADAN 相对于青年人存在明显延迟(Nagamatsu et al., 2011; Yamaguchi et al., 1995)。在振幅上，有研究在区分左右视野后发现，老年人在注意左视野条件下，ADAN 比青年人小(Nagamatsu et al., 2011)。这可能说明老年人的空间注意预期能力在左右视野间存在差异，左视野受老化的影响更为敏感。而且，研究者还发现左视野空间注意预期能力衰退的老年人摔倒风险更大(Nagamatsu et al., 2009)。

总的来说，大部分研究发现老年人的空间预期 ERP 成分振幅与青年人没有明显差异(Hong et al., 2015; Nagamatsu et al., 2011; Yamaguchi et al., 1995)，而潜伏期可能相对于青年人有一定延迟(Nagamatsu et al., 2011; Yamaguchi et al., 1995)。这说明空间注意预期能力在正常老化过程中保留，但是加工速度可能减慢。此外，老年人左视野的空间注意预期受老化影响更为敏感(Nagamatsu et al., 2009, 2011)。这与老年人视觉空间注意的半球不对称性降低的结果一致：在青年人群体中广泛存在的右半球(对应左视野)空间注意优势，在老年人群体中减弱(Learmonth et al., 2017; Schmitz & Peigneux, 2011; 综述见 Sciberras-Lim & Lambert, 2017)。

2.3 正常老化对空间注意预期 alpha 能量偏侧化的影响

空间注意预期诱发的 alpha 振荡活动是否受到正常老化的影响？Hong 等人(2015)研究发现：老年人虽然表现出与青年人振幅相当的空间预期 ERP 成分，但没有表现出枕区 alpha 能量偏侧化效应，见图 2A。这提示老年人空间注意预期 alpha 偏侧化机制可能缺损。采用其他范式的研究也有类似发现：alpha 能量注意调控机制会随着正常老化而衰退(Deiber et al., 2013; Sander et al., 2012; Vaden et al., 2012; van der Waal et al., 2017)。

然而近几年的研究发现了不一致的结果。Leenders 等人(2018)采用 DMS 任务(the Delayed Match-to-Sample task)探究正常老化对工作记忆任务中空 间定向神经活动的影响。该任务要求被试根据线索指示的方向（如图 1D 所示），只对某一侧视野的刺激阵列进行记忆，并判断之后出现的刺激阵列（探针）与该刺激阵列是否相同。结果发现：在线索目标间隔阶段，老年人被试表现出了枕区 alpha 能量偏侧化现象，并且其程度与青年人没有显著差异。Heideman 等人(2018)采用指示性空间线索范式（如图 1C 所示）发现老年人枕区 alpha 能量偏侧化程度大于青年人，并且还发现老年人会表现出独特的枕区 beta 能量偏侧化(β, 13~25Hz)，见图 2B。前人研究将老年人认知活动中独有的 beta 振荡活动解释为对 alpha 振荡活动缺损的补偿(Deiber et al., 2013; Geerligs et al., 2012)。

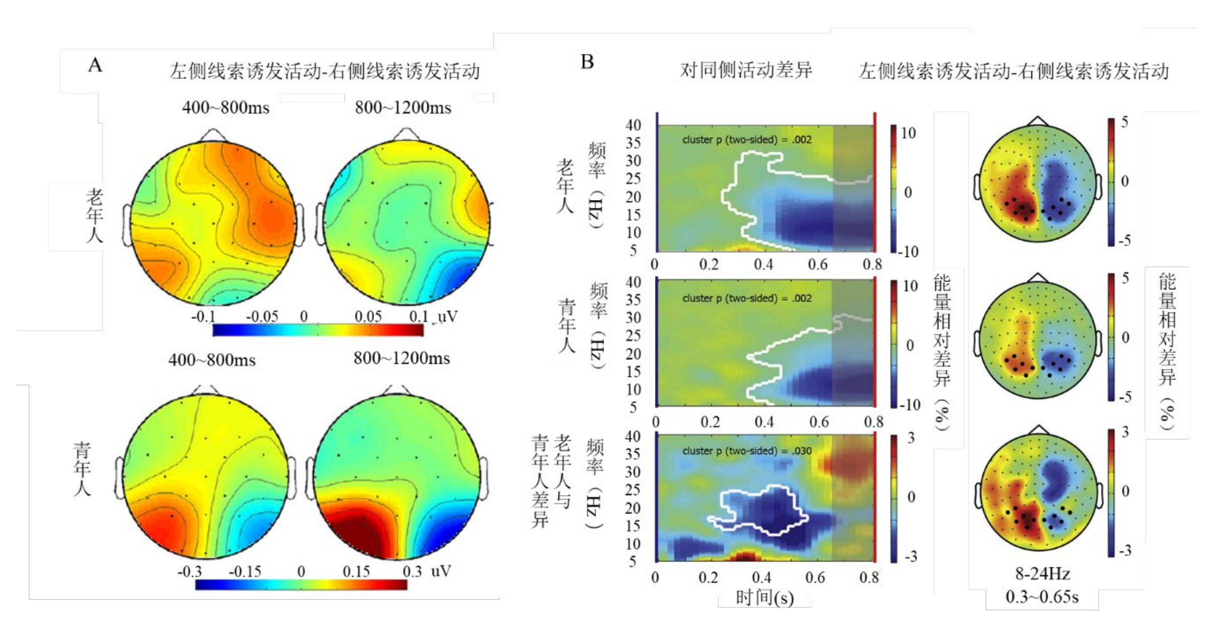


图 2 空间注意预期 alpha 偏侧化的老化研究结果。 (A) 图为提示左右侧 alpha 活动能量差异的地形图，从图中可以看到无论是在 400~800ms 还是在 800~1200ms 的时间窗（以线索出现为零时刻点），青年人均有明显的 alpha 偏侧化活动，老年人则没有。资料来源：修改自“Normal aging selectively diminishes alpha lateralization in visual spatial attention,” by X. Hong, J. Sun, J. J. Bengson, G. R. Mangun, and S. Tong, 2015, *NeuroImage*, *106*, p.359。 (B)左图为对同侧神经振荡活动差异的时频分析图，对侧指的是非提示侧，同侧指的是提示侧，零时刻点为线索出现时间，红线为目标刺激出现时间。右图为提示左右侧神经振荡活动能量差异的地形图，时间窗为线索出现后 300~650ms，分析频率为 8~24Hz。由上至下分别为老年人、青年人以及老年人与青年人差异的活动。

从图中可以看出：老年人有与青年人相似的 alpha 能量偏侧化活动(8~12Hz)，且在 beta 频段(13~24Hz)上也有偏侧化活动。资料来源：修改自“Anticipatory neural dynamics of spatial-temporal orienting of attention in younger and older adults,” by S. G. Heideman, G. Rohenkohl, J. J. Chauvin, C. E. Palmer, F. van Ede, and A. C. Nobre, 2018, *NeuroImage*, *178*, p.49。

总的来说，枕区 alpha 能量偏侧化效应受老化的影响在不同研究中存在差异。老年人的 alpha 能量偏侧化效应可能不存在(Hong et al., 2015)，也可能与青年人类似(Leenders et al., 2018)，还可能比青年人更强(Heideman et al., 2018)。对比这些研究，我们发现它们的任务正确率以及老年人 alpha 能量基线存在明显差异。接下来，我们将对这两个重要影响因素进行探讨。

一方面，任务难度可能会影响老年人空间注意预期的 alpha 调控机制。Hong 等人(2015)的实验，任务难度较低（老年人和青年人的任务正确率都达到 95%以上），没有发现老年人的 alpha 能量偏侧化效应。然而，Heideman 等人(2018)以及 Leenders 等人(2018)的实验都对任务难度进行了较为严格的控制（每位被试的正确率都稳定在 75%左右），发现了老年人的 alpha 能量偏侧化效应。由此我们推测，在达到一定任务难度的条件下，老年人更可能表现出 alpha 偏侧化效应。

另一方面，alpha 能量基线的个体差异可能会影响老年人空间注意预期的 alpha 调控机制。在 Heideman 等人(2018)的研究中，老年人的 alpha 基线能量与青年人没有明显差异，而在 Hong 等人(2015)与 Leenders 等人(2018)的研究中，老年人的 alpha 基线能量均低于青年人，其中 Hong 等人(2015)的 alpha 能量差异更大。因此这些研究结果的不一致可能与它们的老年被试与青年被试的 alpha 基线能量差异不同有关；对于本身 alpha 能量较低的老年人，通过调控 alpha 能量来实现注意预期这一方式可能是低效的。

3 刺激后 200ms 内注意老化效应

选择性注意不仅能够调控线索诱发的大脑活动，为即将出现的刺激加工做好准备，还能作用于刺激加工的早期过程（刺激后 200ms 内），对刺激诱发的大脑活动进行调控，从而促进目标加工。这种注意效应表现为，刺激被注意时所诱发的早期 ERP 成分与不被注意时相比存在差异。根据注意对象不同，可以分为空间注意、特征注意和客体注意等类型。由于特征注意和客体注意的研究范式逻辑相似，我们将其合并为非空间注意进行梳理和分析。

3.1 空间注意

3.1.1 空间注意的研究范式与神经指标

空间注意分为主动性空间注意和反射性空间注意：（1）在主动性空间注意的研究范式

中，提示线索与任务相关，被试会根据提示线索主动将注意分配在某一侧。例如常见的内源性空间线索范式（如图 1 左所示）和 Hillyard 持续性空间注意范式(Hillyard & Münte, 1984)（如图 3A 所示）。（2）在反射性空间注意的研究范式中，提示线索与任务无关，被试会被突显的刺激线索吸引从而被动地将注意分配在某一侧（如图 3B 所示）。

对于同一个刺激而言，注意条件和非注意条件下所诱发的 ERP 活动差异被定义为空间注意效应。在刺激出现后 200ms 内，空间注意效应主要体现在来自纹状外视皮层的两种 ERP 成分上：（1）P1 成分，即刺激出现后 80~120ms 诱发的正波，被认为是最早的受注意调控的感觉加工成分；（2）N1 成分，即刺激出现后 140~200ms 左右诱发的负波，被认为是在早期视觉辨别过程中受注意调控的成分(Mangun & Hillyard, 1991; see also Allon & Luria, 2019; 综述见 Luck & Kappenman, 2012)。

青年人的主动性空间注意研究发现，无论是持续性注意范式(Hillyard & Münte, 1984; Mangun & Hillyard, 1987, 1988)还是内源性空间线索范式(Eimer, 1994; Luck et al., 1994; Mangun & Hillyard, 1991)，刺激在注意条件下所诱发的 P1 振幅和 N1 振幅会比非注意条件下更大(综述见 Luck & Kappenman, 2012; Tunnermann et al., 2015)（见图 1F）。一些青年人的反射性空间注意研究发现：在 SOA 较短时，刺激所诱发的 P1 振幅和 N1 振幅表现出目标增强效应（即非注意条件<注意条件），在 SOA 较长时，刺激所诱发的 P1 振幅和 N1 振幅发生“返回抑制”现象（即非注意条件>注意条件）(Hopfinger & Mangun,1998, 2001; Tian et al., 2011)。但是早期反射性空间注意效应在后续的青年人 ERP 研究中结果并不稳定(Doallo et al., 2005; McDonald et al., 1999; Satel et al., 2013; Wascher & Tipper, 2004; 综述见 Elisa et al., 2015)。

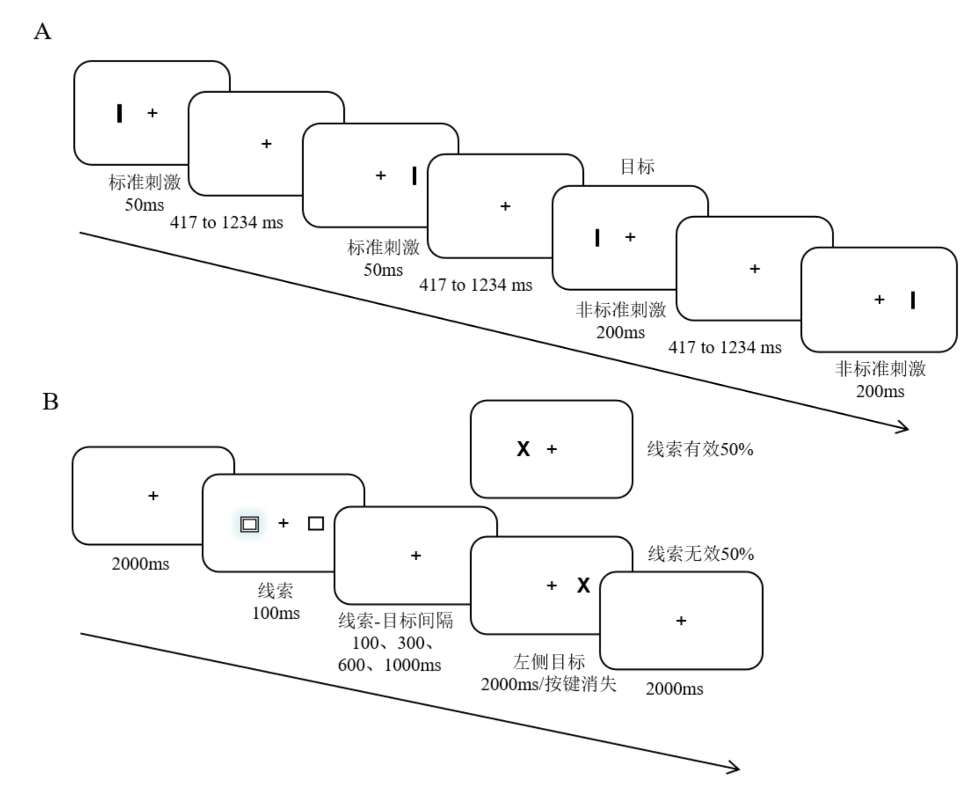


图 3 空间注意研究的范式和老年人 ERP 结果。(A) 持续性空间注意范式。被试盯住中央注视点，保持视线不要偏离，并始终注意某一侧视野的刺激(图中举例为左侧)。在每个试次中，注视点的左侧或右侧会随机呈现一个时间为 50ms 的矩形条 (标准刺激)或时间为 200ms 的矩形条 (非标准刺激)，被试只需在非标准刺激出现在注意侧时按键反应。为了排除刺激物理属性和反应诱发活动的影响，一般分析标准刺激（无需按键）在特定位置上诱发的 ERP 活动。被试的注意侧与该刺激的空间位置一致时是注意条件，不一致时是非注意条件。资料来源：修改自“Selective attention to spatial and non-spatial visual stimuli is affected differentially by age: Effects on event-related brain potentials and performance data,” by D. Talsma, A. Kok, and K. R. Ridderinkhof, 2006, *International Journal of Psychophysiology*, *62*(2), p.251-252。(B)外源性空间线索范式，被试盯住中央注视点，保持视线不要偏离。注视点左右两侧的方格中，其中一个会突然闪烁（线索），吸引被试注意。随后目标刺激将出现在任意一侧视野中，目标刺激与线索提示位置一致(有效条件)和不一致(无效条件)的试次各占 50%，即线索没有提示性。被试需要忽略闪烁刺激，只对目标刺激做反应。

3.1.2 正常老化对主动性空间注意的影响

虽然行为研究表明，老年人的总体反应变慢，在反应时上的注意效应与青年人没有显著差异（综述见 Zanto & Gazzaley, 2017），但是这并不足以说明早期的主动性空间注意不受老化的影响。不少 ERP 研究结果表明，在老年人中发现早期空间注意效应的时间窗比青年人更晚，其中 P1 的研究证据存在不一致(延迟：Curran et al., 2001; Nagamatsu et al., 2011; Yamaguchi et al., 1995; 提前：Wang et al., 2012)；N1 的研究证据较一致(Curran et al., 2001; Hong et al., 2015; Nagamatsu et al., 2011; Wang et al., 2012)。许多研究还发现，无论是内源性空间线索范式(Curran et al., 2001; Lorenzo-López et al., 2002; Nagamatsu et al., 2009, 2011; Wang et al., 2012)还是持续性空间注意范式(Talsma et al., 2006)，老年人在注意条件下的 P1 振幅都比在非注意条件下的更大，且这种差异波与青年人的没有显著差异(Nagamatsu et al., 2011;

Talsma et al., 2006; Wang et al., 2012)。然而，其中有些研究存在信噪比差的问题：一方面可能是因为注意对早期视觉加工成分的调控效应较小，容易受噪音影响；另一方面可能受限于老年人的身体条件，实验的试次数通常都比较少。上述研究表明，老年人的早期主动性空间注意调控可能发生得比青年人晚，并且在 P1 振幅上的效应不受老化影响。

然而，N1 注意效应的年龄差异却存在不一致的研究结果。已有研究发现，老年人同样有空间注意对 N1 成分的调控效应(Curran et al., 2001; Hong et al., 2015; Nagamatsu et al., 2009, 2011; Talsma et al., 2006; Wang et al., 2012)。其中在概率性线索任务下，N1 注意效应大小与青年人没有显著差异(Curran et al., 2001; Nagamatsu et al., 2011; Wang et al., 2012)。这支持了老年人的早期主动性空间注意调控没有衰退这一观点(见综述 Sciberras-Lim & Lambert, 2017; 见综述 Zanto & Gazzaley, 2017)。然而，Hong 等人(2015)通过指示性线索任务（图 1B）发现老年人的 N1 注意效应比青年人更弱。Talsma 等人(2006)在持续性空间注意范式(图 3A)下甚至发现老年人的 N1 注意效应比青年人更强。对比这些研究，我们发现它们的任务正确率以及范式涉及的注意机制存在差异。接下来，本文将从这两个方面详细阐述。

一方面，任务难度可能会影响老年人的早期主动性注意调控机制。Talsma 等人(2006)的持续性空间注意任务正确率不超过 87%（老年人与青年人相当），任务难度较高，同时该研究发现老年人 N1 注意效应更强。其他研究中的任务正确率都高于 95%，任务难度较低，则没有出现上述现象。由此猜测，老年人可能会在任务难度较高时，为了保持与青年人一样好的行为表现，调用更多注意资源，表现为 N1 注意效应增强。在任务难度较低时，老年人无需依靠更强的主观努力便能取得很好的成绩，因此不会表现出比青年人更强的 N1 注意效应。

另一方面，即使在任务都简单的情况下(Curran et al., 2001; Nagamatsu et al., 2011; Wang et al., 2012; Hong et al., 2015)，早期主动性注意调控的老化在不同注意机制下可能存在差异。我们推测：在概率性线索范式下，被试需要对提示侧与非提示侧的刺激都作反应，可能主要涉及对提示侧的目标增强过程。然而在指示性线索范式中，被试只需要对提示侧的刺激作反应，可能既涉及对提示侧的目标增强过程，也涉及了对非提示侧的干扰抑制过程。梳理以往研究发现，N1 注意效应在概率性线索范式下不受老化影响(Curran et al., 2001; Nagamatsu et al., 2011; Wang et al., 2012)，而在指示性线索范式下随着老化而有所衰退(Hong et al., 2015)。如果老年人的干扰抑制能力有所衰退，那么就有可能解释上述研究在不同范式下的不一致。但是目前还没有 ERP 研究尝试分离空间注意中老化对目标增强和干扰抑制机制的影响。

综上，老年人的早期主动性空间注意存在以下特点：老年人有类似于青年人的早期 P1

和 N1 振幅的注意效应(Curran et al., 2001; Hong et al., 2015; Lorenzo-López et al., 2002; Nagamatsu et al., 2009, 2011; Talsma et al., 2006; Wang et al., 2012)，但该注意效应比青年人延迟(Curran et al., 2001; Lorenzo-López et al., 2002; Yamaguchi et al., 1995)。其中，已有证据一致表明老年人在 P1 振幅上的注意效应保留，而 N1 振幅注意效应的年龄差异在不同研究之间存在不一致，这可能与这些研究的任务难度和范式涉及的注意机制不一样有关。老年人的 N1 注意效应可能会在困难任务中增强(Talsma et al., 2006)，而在简单且不涉及干扰抑制过程的任务中不受老化影响(Curran et al., 2001; Nagamatsu et al., 2011; Wang et al., 2012)，在涉及干扰抑制的范式中则可能存在衰退(Hong et al., 2015)。

3.1.3 正常老化对反射性空间注意的影响

行为研究表明，老年人和青年人一样，存在反射性空间注意调控效应（注意条件下与非注意条件下的反应时存在显著差异），其中返回抑制效应（反应时：注意条件>非注意条件）出现较晚（需要更长的 SOA）(Castel et al., 2003; Guilbert et al., 2019; Li et al., 2020; Muiños et al., 2016; Olk & Kingstone, 2014; 综述见 Erel & Levy, 2016)。目前关于反射性空间注意老化的 ERP 研究较少。Lorenzo-López 等人(2002)最早采用外源性空间线索范式来探究反射性空间注意在神经活动上的老化效应，但是该研究中采用的外周线索是有预测信息的线索（75%的目标会出现在线索提示的位置），混杂了自上而下的主动性注意过程，此处不讨论其结果。后续只有一个 ERP 老化研究采用了外源性空间线索范式(Amenedo et al., 2014)，但该研究存在这些问题：（1）该研究采用了上下视野的刺激呈现方式，无法得到清晰的 P1 注意效应；（2）这项研究只探究了长 SOA 条件下的“返回抑制”效应，而没有设置短 SOA 条件，难以清晰地探讨老年人反射性空间注意的促进效应。总而言之，尚无 ERP 研究证据可以清晰地说明反射性注意的老化机制。

目前使用外源性空间线索范式来研究早期反射性注意效应的老化机制可能存在两点困难：一方面，在短 SOA 条件下，线索诱发的中晚期 ERP 成分和刺激诱发的早期 ERP 成分很容易重叠在一起，使得研究者难以抽提出纯粹的由刺激诱发的早期 ERP 成分。另一方面，老年人的返回抑制发生时间存在个体差异(Li et al., 2020)。而研究通常会固定一定数量的 SOA。不同被试在同一种 SOA 下的注意状态可能不一致：有的正处在注意促进状态，而有的可能已经进入返回抑制状态。因此难以得到稳定、一致的早期空间注意 ERP 结果。未来，反射性空间注意的 ERP 老化研究还需要改善任务范式来做进一步探究。

3.2 非空间注意

3.2.1 非空间注意的实验范式与神经指标

非空间注意包括基于特征的注意以及基于客体的注意。非空间注意范式与空间注意范式的注意效应分析逻辑基本一致，都是对比同一刺激在不同注意条件下的大脑活动差异。在非空间注意范式中，被试需要在不同条件下注意不同的特征属性或客体类别。

特征注意老化 ERP 研究一般采用 Hillyard 持续性注意任务(Hillyard & Münte, 1984)。以基于空间频率的特征注意任务为例(Talsma et al., 2006)：实验流程如图 4，同一空间频率的标准刺激（呈现时间较短，无需按键）在不同注意条件下（刺激的空间频率与被试需要注意的空间频率一致 vs 不一致）诱发的 ERP 差异被定义为特征注意效应，这可以排除反应诱发的 ERP 活动以及物理刺激差异的影响。在刺激出现后 200ms 内，特征注意效应体现在注意条件与非注意条件刺激诱发的两种差异波成分上：（1）SP 成分(the anterior selection positivity)，是发生在刺激后 150~190ms 位于前额的选择性正波，一般被认为反映了由任务相关刺激驱动的注意调制过程；（2）SN 成分(the posterior selection negativity)，是发生在刺激后 120~300ms 位于外侧枕叶的选择性负波，一般被认为反映了任务相关特征相对于非相关特征的感知觉加工增强过程(综述见 Luck & Kappenman, 2012)。

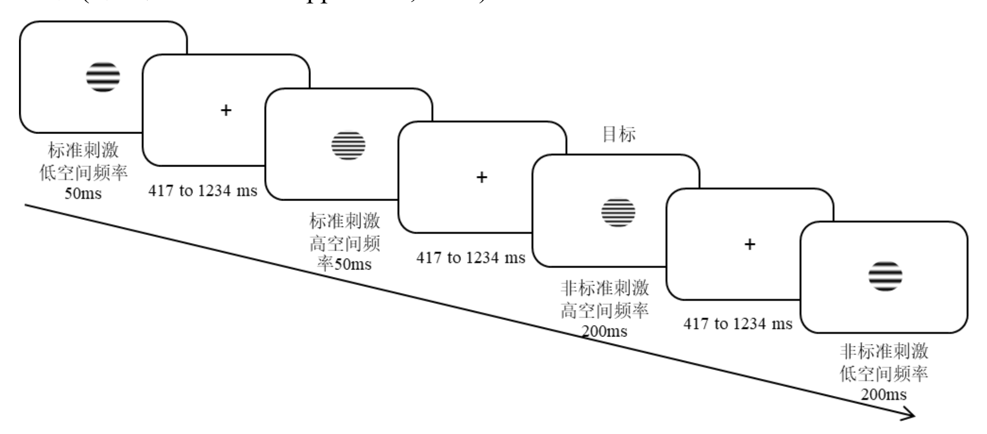


图 4 基于空间频率的特征注意任务。实验连续随机呈现四种刺激：空间频率高（低）且呈现时间长（短）的光栅。任务要求被试在一半组块中注意空间频率高的光栅（如图举例），在另一半组块中注意空间频率低的光栅，并在检测到需要注意的频率且呈现时间较长的光栅（非标准刺激）时（如图举例为高空间频率且呈现 200ms）按键反应。在该实验中，被试无需对呈现时间较短（标准刺激）或非注意空间频率光栅进行反应。资料来源：修改自“Selective attention to spatial and non-spatial visual stimuli is affected differentially by age: Effects on event-related brain potentials and performance data,” by D. Talsma, A. Kok, and K. R. Ridderinkhof, 2006, *International Journal of Psychophysiology*, *62*(2), p.256-257。

关注早期客体注意效应的老化 ERP 研究较少。以 Gazzaley 等人(2008)的客体注意研究为例（实验流程如图 5 所示）：该研究将面孔（或场景）刺激在注意面孔（或场景）与被动观看条件下的活动差异定义为目标增强效应，而在忽略面孔（或场景）与被动观看条件下的

活动差异定义为干扰抑制效应，从而分离目标增强和干扰抑制的老化影响。在该研究中，早期注意效应体现在 P1 和 N1 成分上。

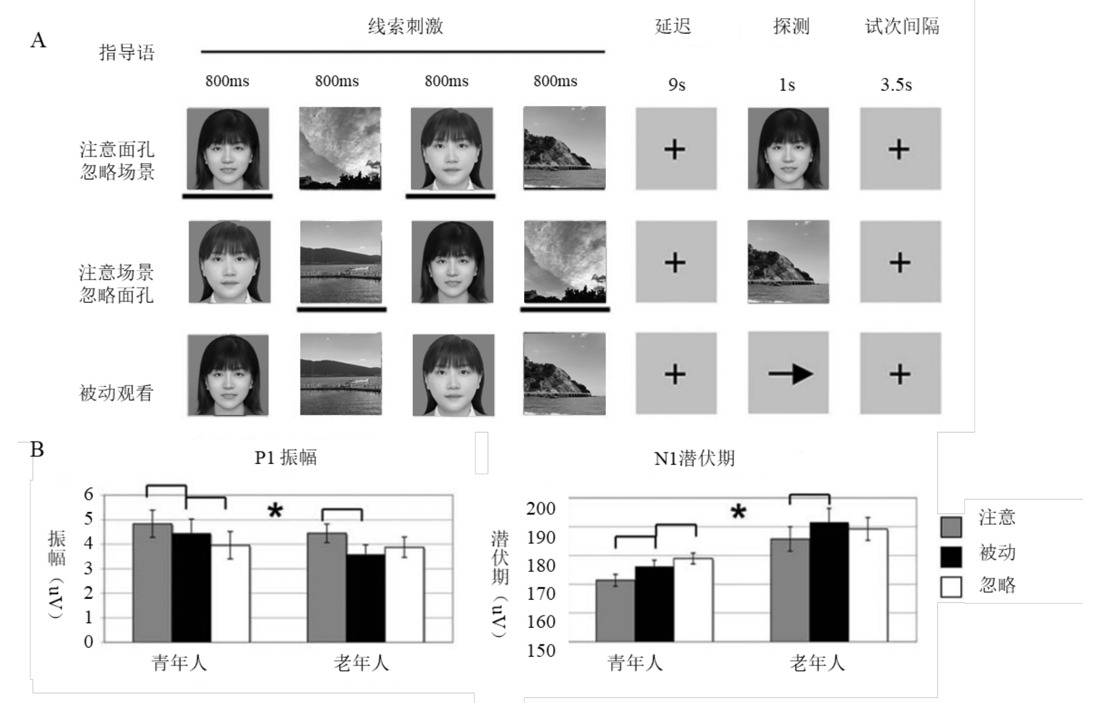


图 5 延迟识别工作记忆任务及主要结果。资料来源：修改自“Age-related top-down suppression deficit in the early stages of cortical visual memory processing,” by A. Gazzaley, W. Clapp, J. Kelley, K. McEvoy, R. T. Knight and M. D' Esposito, 2008, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(35), p. 13123。 (A)任务流程，屏幕呈现面孔或场景图片，并在不同的任务条件下要求被试注意特定类别的图片：注意面孔（忽略场景）、注意场景（忽略面孔）以及被动观看。在前两种条件下，被试需要判断随后呈现的探测图片是否为之前注意过的图片，而在被动观看条件（中性条件）下，被试需要判断箭头方向（与图片无关）。刺激下面的线是用来强调任务相关性的，而在实际的任务中并不存在。(B)图中显示了面孔图片诱发的 P1 振幅和 N1 潜伏期的结果，中括号表明存在显著差异，例如老年人注意条件的 P1 振幅显著大于忽略条件。

3.2.2 正常老化对特征注意的影响

Kenemans 等人(1995)最早采用基于空间频率的特征选择性注意任务探究正常老化对早期特征注意的影响。该研究发现老年人特征注意 SP 成分振幅与青年人没有显著差异，SN 成分振幅比年轻人弱，而两成分潜伏期均比青年人长。SP 和 SN 成分潜伏期延迟在后续的研究中被重复(SP 成分延迟：Alperin et al., 2013; Haring et al., 2013; SN 成分延迟：Alperin et al., 2013; Zanto, Toy & Gazzaley, 2010)，这提示老年人的特征选择过程发生比青年人晚。

后续研究同样发现老年人 SP 振幅与青年人没有差异(Alperin et al., 2013; Talsma et al., 2006)，然而有研究发现老年人和青年人 SP 成分的来源可能不同。Haring 等人(2013)在颜色选择性注意任务中增加中性条件(不关注颜色)。结果发现（如图 6 所示）：当只对比注意条件与非注意条件的差异时，青年人和老年人的 SP 振幅没有显著差异。当引入中性条件时，青年人的早期特征注意效应主要来源于对无关刺激的抑制过程（SP 振幅，注意条件≈中性条件>非注意条件），而老年人的注意效应主要来源于对相关刺激的增强过程（SP 振幅，注意条件>非注意条件≈中性条件）。该研究提示老年人在早期注意选择上存在干扰抑制能力缺损，利用目标增强机制进行注意选择的补偿。

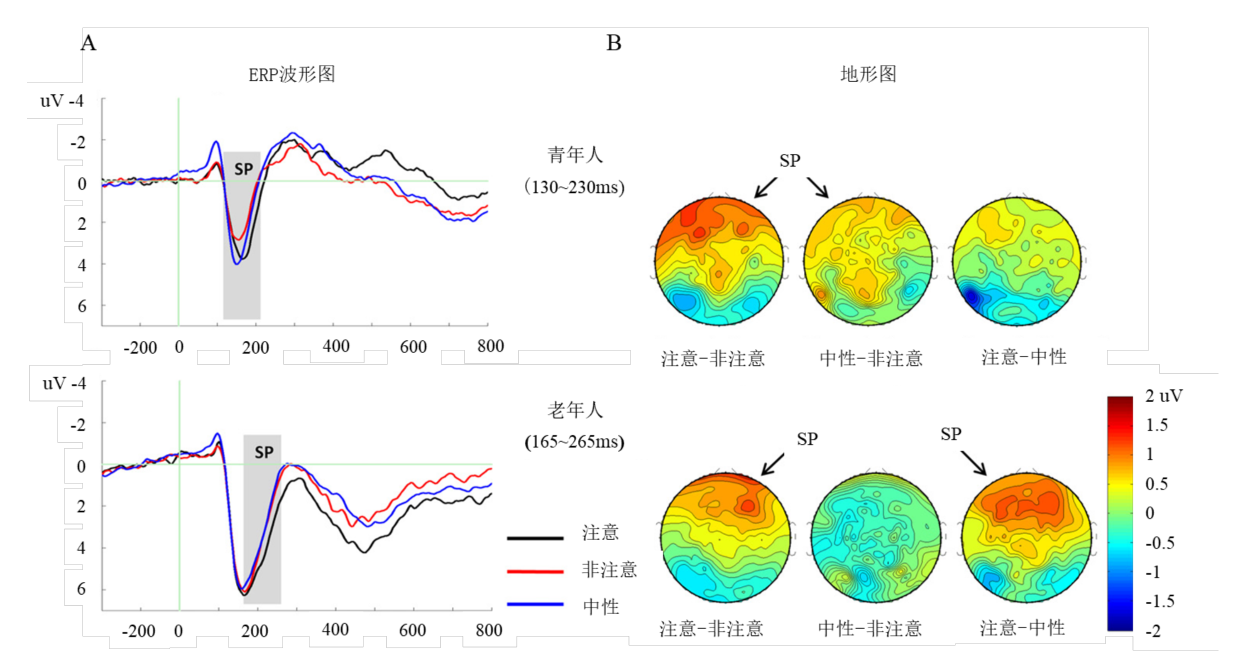


图 6 青年人和老年人的特征注意 ERP 对比研究的结果。资料来源：修改自“Age-related differences in enhancement and suppression of neural activity underlying selective attention in matched young and old adults,” by A. E. Haring, T. Y. Zhuravleva, B. R. Alperin, D. M. Rentz, P. J. Holcomb and K. R. Daffner, 2013, *Brain Research*, *1499*, p.74。 (A) 标准刺激在注意条件、非注意条件和中性条件下诱发的前额正向 ERP 活动。SP 为注意条件（黑线）比非注意条件（红线）更正的差异活动，老年人的 SP 成分潜伏期比青年人更晚。(B) 任意两种条件间的差异波地形图。青年人的 SP 成分主要来源于中性与非注意条件的差异，老年人的 SP 成分主要来源于注意与中性条件的差异。

后续研究在 SN 振幅是否受老化影响的结果上存在不一致(Alperin et al., 2013; Talsma et al., 2006; Zanto, Toy & Gazzaley, 2010)。一部分研究发现老年人特征注意 SN 振幅与青年人没有显著差异(Alperin et al., 2013)，而有的研究发现老年人 SN 振幅相比青年人更弱(Zanto, Toy & Gazzaley, 2010; Kenemans et al., 1995)，还有研究发现老年人振幅更强(Talsma et al., 2006)。这些研究结果差异可能与范式涉及了不同的特征注意机制、任务难度以及被试群体差异有关。

首先，不同研究范式可能涉及的特征注意机制存在差异。特征注意包括特征维度内的选

择性注意（例如注意红色或注意绿色）以及特征维度间的选择性注意（例如注意颜色或注意运动），二者受老化的影响可能存在差异。Zanto, Toy 和 Gazzaley(2010)的实验采用延迟识别工作记忆任务（任务流程类似于图 5），让被试注意颜色忽略运动或注意运动忽略颜色，探究的是特征维度间的注意选择，该研究发现特征维度间的注意选择随老化而衰弱。然而其他研究采用的是 Hillyard 持续性注意范式（实验流程类似于图 4），关注的是特征维度内的注意选择(Kenemans et al., 1995; Talsma et al., 2006)，其注意机制随老化变化尚存争议。

其次，任务难度可能会导致特征注意老化效应的差异。在 Alperin 等人（2013）的研究中，老年人和青年人的正确率都较高（正确率 90%以上），SN 振幅没有年龄差异。然而 Kenemans 等人(1995)和 Talsma 等人(2006)的研究任务都较难（正确率 85%左右），均发现 SN 振幅受到老化的调控。

最后，老年人被试的年龄差异可能也会导致研究结果不一致。Kenemans 等人(1995)和 Talsma 等人(2006)的研究任务难度相似，但是被试平均年龄存在差异。Kenemans 等人(1995)的研究中老年被试的平均年龄为 73.9 岁，发现老年人 SN 振幅相对青年人减弱。Talsma 等人(2006)的研究中老年被试的平均年龄为 68 岁，却发现老年人 SN 振幅没有减弱，甚至更强。假如不同年龄阶段的老年人特征选择过程存在差异，则可能造成上述研究结果的不一致。

总的来说，老年人有类似于青年人的特征选择机制(Alperin et al., 2013; Haring et al., 2013; Kenemans et al., 1995; Talsma et al., 2006; Zanto, Toy & Gazzaley, 2010)；但是该过程发生得更晚(Alperin et al., 2013; Haring et al., 2013; Zanto, Toy & Gazzaley, 2010)。值得注意的是，有研究表明老年人位于前额的注意机制可能存在干扰抑制缺损（体现在 SP 振幅上），而且目标增强过程能够对其进行补偿(Haring et al., 2013)。此外，老年人反映在 SN 振幅上的注意机制与青年人是否存在差异，各个研究的结果不太一致。其中范式差异、任务难度以及老年人个体差异可能是其主要原因。

3.2.3 正常老化对客体注意的影响

关注早期注意效应的客体注意老化研究较少。其中 Gazzaley 等人(2008)采用延迟识别工作记忆任务(delayed recognition working memory task，实验流程及结果见图 5)探究正常老化对早期客体注意的影响。研究发现：青年人既表现出对注意刺激的目标增强效应（刺激诱发的 P1 振幅：注意条件>被动观看；刺激诱发的 N1 潜伏期：注意条件<被动观看），又表现出忽略刺激的干扰抑制效应（刺激诱发的 P1 振幅：忽略条件<被动观看；刺激诱发的 N1 潜

伏期：忽略条件>被动观看）。相比之下，老年人无论在 P1 振幅还是在 N1 潜伏期上都只表现出目标增强效应，而没有干扰抑制效应（刺激诱发的 P1 振幅/N1 潜伏期：忽略条件≈被动观看），见图 5B。这表明老年人可能无法在视觉加工的早期阶段抑制任务无关信息。

Zanto, Hennigan 等人(2010)在 Gazzaley 等人(2008)实验设计的基础上，增加被试对刺激相关信息有先验知识的条件（即提前告知被试任务相关刺激即将出现在第几个位置），进一步探究老年人在有先验知识的情况下能否在早期阶段抑制无关信息。结果发现：即使给予被试刺激相关的先验知识，老年人还是无法在早期加工阶段对无关信息进行抑制，实验结果与 Gazzaley 等人(2008)相似。de Fockert 等人(2009)利用面孔图片为干扰刺激时诱发的 N170 成分（面孔刺激特异性成分，潜伏期大约在 170ms）作为干扰物加工的指标，来探究抑制能力的老化。该实验在屏幕中央同时呈现名人的名字以及面孔，被试的任务是对人名进行类别判断（判断名字是流行乐手还是政治家）。若同时出现的面孔与人名是同一类别，则为相容条件；若不是同一类别，则为不相容条件。不相容条件下面孔会干扰被试对名字的判断，因此被试需要对人脸刺激进行抑制。研究结果发现：在不相容(抑制)条件下，老年人的 N170 成分振幅显著大于青年人；而在相容条件下老年人与青年人 N170 振幅没有显著差异。该结果说明老年人对干扰面孔的抑制能力比青年人差。

以上研究表明：在对 P1 振幅和 N1 潜伏期的注意调控上，老年人目标增强机制保留，干扰抑制机制衰退(Gazzaley et al., 2008; Zanto, Hennigan et al., 2010)；面孔作为任务无关刺激时诱发的 N170 成分也发现老年人抑制能力缺损(de Fockert et al., 2009)。这提示我们，在视觉早期加工阶段，老年人抑制干扰的能力可能缺损。

4　早期注意老化效应的影响因素

从目前梳理的视觉早期注意老化 ERP 研究中，我们不难发现老年人早期注意效应在 ERP 振幅上研究结果不一致（刺激前枕区 alpha 能量偏侧化，早期空间注意 N1 振幅以及早期特征注意 SN 振幅）。通过对比这些研究结果，我们提出任务难度、目标增强和干扰抑制的分离、信噪比以及老年个体差异可能会对早期注意老化效应造成影响。本节将更为系统地论述这些因素如何影响早期注意老化效应。

4.1　任务难度

青年人研究表明，任务难度会对注意效应本身造成影响。Lavie(2005)提出的知觉负荷理论认为，由于注意资源有限，知觉负荷越大，人对任务相关刺激的注意分配越多，加工任务

无关刺激的注意资源就越少，即高知觉负荷能够减少干扰物的加工，因而注意效应越大。例如 Ding 等人(2014)运用中央 RSVP 任务探究任务负荷对注意神经活动的影响，发现高负荷条件任务相关刺激与无关刺激诱发的早期活动差异比低负荷条件大。该研究说明早期注意过程受到任务难度的调控。因此在探究正常老化对早期注意效应的影响时，特别需要考虑任务难度的影响。

任务难度对早期注意老化效应的影响体现在两个方面。一方面，任务难度对注意效应本身的影响会混淆对注意老化效应的观测。在较大难度的任务中，注意效应更强(Ding et al., 2014)，而当任务负荷超过已有的注意资源时，注意效应反而可能减弱(综述见 Cabeza et al., 2018)。本文的一些老化研究在不调整实验参数的情况下让老年人完成与青年人一样的任务，这样容易造成老年人的任务难度比青年人更难。因此难度造成的注意效应变化可能会混淆老化的影响。例如：Talsma 等人(2006)的研究发现老年人空间注意 N1 振幅和特征注意 SN 振幅都显著大于青年人，这可能是因为任务更难，老年人调动了更多的注意资源以完成任务；Kenemans 等人(1995)的研究发现老年人的 SN 振幅和行为成绩都比青年人小，这可能是因为此时老年人任务难度已经超过其注意负荷，其注意效应反而减小。上述两个研究中老年人和青年人的结果差异可能仅仅体现了任务难度对注意效应的影响，而非老化因素的作用。

少量研究通过调节实验参数匹配了被试群体的难度，从而排除了难度的混淆(Heideman et al., 2018; Leenders et al., 2018)。此外，部分研究没有调整参数，但任务非常简单（老年人与青年人的正确率均达到 95%以上），老年人与青年人的任务成绩都位于天花板，此时难度的混淆效应也几乎不存在(Alperin et al., 2013; Curran et al., 2001; Hong et al., 2015; Nagamatsu et al., 2011）。

另一方面，在已经避免了难度因素混淆老化效应的情况下，老年人不同阶段的视觉早期注意受难度的影响可能存在差异。当任务较难时，一些研究在预期注意阶段观察到老年人 alpha 能量偏侧化现象(Heideman et al., 2018; Leenders et al., 2018)；而当任务比较简单时，老年人的 alpha 偏侧化效应消失(Hong et al., 2015)。这提示可能只有在任务达到一定难度时，老年人才有 alpha 偏侧化效应。然而在早期注意阶段，当任务比较简单时，老年人的注意效应并没有受老化影响，具体体现为空间注意 N1 振幅注意效应(Curran et al., 2001; Nagamatsu et al., 2011; Wang et al., 2012)和特征注意 SN 振幅注意效应(Alperin et al., 2013)没有年龄差异。这提示难度对早期注意老化的影响与对注意预期老化的影响不一致。

4.2 目标增强和干扰抑制的分离

选择性注意一般被认为能够促进任务相关刺激的加工活动（目标增强）以及减弱任务无关刺激的加工活动（干扰抑制）(综述见 Baluch & Itti, 2011)。有研究表明，青年人的视觉搜索效率既可以通过提示目标位置（增强目标注意），也可以通过提示干扰子位置（增强干扰抑制）得以提升，但如果干扰子位置在试次之间发生改变，则没有提升作用；此外，自上而下的 alpha 振荡活动调控与目标位置提示有关，与干扰位置提示无关(Noonan et al., 2016)。van Moorselaar 和 Slagter(2019)的研究也表明，提示目标位置可以改变与空间位置有关的神经调谐活动(neural tuning)，进而增强对目标位置的神经敏感性，但提示干扰子位置没有这种作用。这些结果表明，选择性注意中的目标增强和干扰抑制可能具有不同的神经机制。因此我们推测正常老化对目标增强与干扰抑制的影响可能存在差异。

一些关于特征注意和客体注意的老化研究发现，在刺激加工的早期阶段，老年人抑制干扰的能力缺损，而目标增强的能力保留(Gazzaley et al., 2008; Haring et al., 2013; Zanto, Hennigan et al., 2010)。这表明视觉非空间早期注意的目标增强和干扰抑制过程受老化的影响存在分离，干扰抑制过程可能更为敏感。

我们推测，早期空间注意可能也存在与早期非空间注意中相似的老化机制，即干扰抑制过程衰退。这种假设可以解释 N1 振幅注意效应在老化研究间的不一致。Hong 等人(2015)的研究通过指示性线索任务（同时涉及目标增强和干扰抑制）发现老年人的 N1 注意效应相对于青年人的有所减弱。然而其他研究者通过概率性线索任务（主要涉及目标增强）发现老年人的 N1 注意效应与青年人的无显著差异(Curran et al., 2001; Nagamatsu et al., 2011; Wang et al., 2012)。但是目前尚无研究证据能够直接证明这种假设。

4.3 信噪比

目前在早期空间注意老化研究中，有不少研究存在信噪比差的问题。这很可能是导致早期空间注意研究之间结果不一致的重要原因之一，主要体现在两个方面：

一方面，早期注意本身的 ERP 效应较弱。尤其是 P1 振幅的注意效应，注意条件和非注意条件的差异可能只有 1μV 左右（见图 1F），在其他老化研究中甚至只有 0.3~0.5μV。在这种效应本身较小的情况下，可能并不容易观测到老年人和青年人的差异。此外，N1 振幅的注意效应在老化研究中也不到 2μV。当数据信噪比不佳时，这些早期注意效应在 ERP 成分的潜伏期和振幅上的表现可能会不稳定，进一步导致不同研究得到的早期注意老化机制受到

影响。

另一方面，目前老年人实验的试次数一般不多，容易导致迭加平均无法完全消除噪音，混淆真正有效的 ERP 成分。首先，受限于身体状况，老年被试并不适合做持续时间太长的视觉实验，这限制了单次实验的试次数。在青年人实验中，经典早期空间注意效应（见图 1F）的总试次数可达到 2000(Mangun & Hillyard, 1991)，而老年人实验的总试次数普遍低于 1000。其次，由于空间提示范式中的注意效应取决于占比较少的非注意条件的试次数，最终老年人实验中参与分析的非注意条件试次数通常只有 200 左右。试次数不足，会影响迭加平均后 ERP 波形的质量。

4.4 老年人的个体差异

在前文的分析中，我们提出老年人的个体差异可能是引起研究结果不一致的原因，即不同老年群体的早期注意效应可能也不同。这里主要探讨年龄和认知能力的差异对早期注意效应老化的影响。

一方面，研究间的不一致可能是由老年人样本的年龄区间不同所导致的。例如：Talsma 等人(2006)研究中的老年人平均年龄（约为 68 岁）小于 Kenemans 等人(1995)研究中的老年人平均年龄（约为 74 岁）。相似范式下，同样是 SN 成分的振幅，前者发现老年人比青年人强，而后者发现老年人比青年人弱。Zhuravleva 等人(2014)探究了不同年龄阶段对特征注意选择过程的影响，发现：高龄组（80 岁以上）SN 振幅低于低龄组（67~80 岁）。这可能表明随着年龄的增长，老年人早期注意选择能力减弱。

另一方面，研究间的不一致可能与老年人样本的认知能力水平差异有关。即使是正常老年人，其认知能力水平也会存在较大个体差异(Li et al., 2020)。例如，正常老年人的 ACE-R（the Addenbrooke’s Cognitive Examination Revised，见 Mathuranath et al., 2000）认知测试成绩范围可涵盖 85~100 分。有研究发现综合认知能力较低的老年人 alpha 能量减弱，且会产生较高频的 beta 振荡活动(Deiber et al., 2015)。这提示老年人的 EEG 活动与老年人的认知能力水平有关。已有研究大部分直接选取正常老年人作为研究对象，而没有对其认知能力进行更为细致的划分，因此不同研究样本的认知能力存在差异。这种差异可能是老年人空间预期注意 alpha 能量研究结果不一致的原因之一。

5 总结与展望

5.1 已有研究总结

本综述通过梳理注意老化 ERP 研究发现老年人部分视觉早期注意能力保留，而部分受到老化影响。老年人的视觉早期注意能力保留主要体现在两个方面：一方面，老年人的注意预期调控 ERP 成分（后部 EDAN 成分）与青年人的没有显著差异，并且在有一定难度的任务下，其注意预期 alpha 能量偏侧化可以与青年人一样，甚至更强；另一方面，老年人的早期空间注意调控能力（体现在 P1 振幅上）与青年人没有显著差异。老年人的视觉早期注意能力衰退则主要体现为：第一，老年人的早期注意效应在多个注意阶段都存在延迟，体现在注意预期 ADAN、空间注意 N1、特征注意 SN 和 SP 的潜伏期延迟；第二，老年人视觉早期注意的目标增强机制保留，干扰抑制机制缺损。该结论主要体现在特征注意的 SN 成分和客体注意的 P1、N1 成分上，但是目前在空间注意上还缺乏直接的研究证据。

然而，在 ERP 成分振幅上，注意老化研究结果还有一些争议。一方面，同一注意类型的不同成分受老化影响的表现不同：早期空间注意中，老年人的 P1 注意效应保留，而 N1 注意效应有增强，有保留，也有减弱。这可能与信噪比、任务难度和范式类型有关。早期特征注意中，老年人的 SP 注意效应可能存在干扰抑制衰退，而 SN 注意效应有增强，有保留，也有减弱。这可能与任务难度以及老年人个体差异有关。另一方面，同一种 ERP 成分在不同注意类型中受老化影响的表现也不相同：早期空间注意中，老年人的 P1 注意效应保留；早期客体注意中，老年人的 P1 注意效应存在干扰抑制衰退。

5.2 未来研究展望

基于以上总结和讨论，未来的早期注意老化研究应该致力于以下几个方向：

首先，注意老化的薄弱领域有待后续研究补充。目前关于老年人反射性空间注意的 ERP 研究较为匮乏。自下而上的注意调控效应的老化机制尚不明确。有研究发现老年人的返回抑制起始时间与其综合认知能力相关(Li et al., 2020)。因此未来研究可以考虑结合老年人的认知特点以改进外源性空间线索范式在 ERP 研究中的不足。此外，老年人实验的信噪比问题尤其值得引起重视。为了得到更稳定的早期注意效应，未来老化研究需要保证足够的试次数。

其次，注意老化的研究需要考虑难度因素的影响。难度会影响到注意老化的许多表现，然而，目前考虑到难度影响或系统探究难度对老年人注意过程影响机制的研究很少。未来的

研究，一方面可以考虑在实验刺激（诱发 ERP 的刺激）相同的情况下调控其他实验参数，使得老年人和青年人任务难度匹配，从而得到更纯粹的老化对注意效应的影响。例如，对 Talsma 等人(2006)的任务范式进行改编，给所有被试都呈现一样的标准刺激，通过调整非标准刺激与标准刺激之间的辨别难度（不影响标准刺激诱发的感觉 ERP 成分）来控制群体层面甚至个体层面的正确率。另一方面，未来可以尝试探索在不同任务难度下老年人注意机制的变化，绘制老年人注意效应的难度调控曲线，以便系统地探究注意老化的内在机制。

再次，注意老化的研究需要考虑采用能够分离目标增强和干扰抑制的实验设计，从而进一步解释老化对早期注意过程的影响机制。已有特征注意及客体注意老化研究表明，老年人可能存在干扰抑制机制缺损。目前注意预期和空间选择性注意方面还缺乏相关的直接证据。虽然已有研究发现老年人一些注意效应指标（如：早期空间注意 P1 效应）与青年人没有明显差异，但是在老年人群体中可能存在着目标增强补偿干扰抑制衰退的机制。因此未来的注意老化研究可以通过实验设计（例如设计中性条件）分离目标增强和干扰抑制过程，从而更为细致地探究注意老化机制。

最后，未来研究应充分考虑老年人群体内部的差异性。不同年龄和不同认知能力水平的老年人群体间注意机制可能存在差异。目前大部分研究都通过对比老年人与青年人群体行为或神经指标的差异，探究正常老化对注意过程的影响。较少研究针对不同老年人群体进行注意老化机制的探究。未来研究可以考虑区分年龄阶段或认知能力水平，以探究老年人群体内部的注意机制差异。

参考文献

Allen, H. A., & Payne, H. (2012). Similar behavior, different brain patterns: Age-related changes in neural signatures of ignoring. *NeuroImage*, *59*(4), 4113–4125.

Allon, A. S., & Luria, R. (2019). Filtering performance in visual working memory is improved by reducing early spatial attention to the distractors. *Psychophysiology*, *56*(5), 1–15.

Alperin, B. R., Haring, A. E., Zhuravleva, T. Y., Holcomb, P. J., Rentz, D. M., & Daffner, K. R. (2013). The dissociation between early and late selection in older adults. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *25*(12), 2189–2206.

Amenedo, E., Gutiérrez-Domínguez, F. J., Mateos-Ruger, S. M., & Pazo-Álvarez, P. (2014). Stimulus-locked and response-locked ERP correlates of spatial inhibition of return (IOR) in old age. *Journal of Psychophysiology*, *28*(3), 105–123.

Amenedo, E., Lorenzo-López, L., & Pazo-Álvarez, P. (2012). Response processing during visual search in normal aging: The need for more time to prevent cross talk between spatial attention and manual response selection. *Biological psychology*, *91*(2), 201–211.

Baluch, F., & Itti, L. (2011). Mechanisms of top-down attention. *Trends in neurosciences*, *34*(4), 210–224.

Cabeza, R., Albert, M., Belleville, S., Craik, F., & Rajah, M. N. (2018). Maintenance, reserve and compensation: The cognitive neuroscience of healthy ageing. *Nature reviews Neuroscience*, *19*(11), 701–710.

Castel, A. D., Chasteen, A. L., Scialfa, C. T., & Pratt, J. (2003). Adult age differences in the time course of inhibition of return. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, *58*(5), 256–259.

Curran, T., Hills, A., Patterson, M. B., & Strauss, M. E. (2001). Effects of aging on visuospatial attention: an ERP study. *Neuropsychologia*, *39*(3), 288–301.

de Fockert, J. W., Ramchurn, A., Van Velzen, J., Bergström, Z., & Bunce, D. (2009). Behavioral and ERP evidence of greater distractor processing in old age. *Brain research*, *1282*, 67–73.

Deiber, M.P., Ibañez, V., Missonnier, P., Rodriguez, C., & Giannakopoulos, P. (2013). Age-associated modulations of cerebral oscillatory patterns related to attention control. *NeuroImage*, *82*, 531–546.

Deiber, M.P., Meziane,H. B., Hasler,R., Rodriguez, C., Toma, S., Ackermann, M., …& Giannakopoulos, P. (2015). Attention and working memory-related EEG markers of subtle cognitive deterioration in healthy elderly individuals. *Journal of Alzheimer's Disease*, *47*(2), 335–349.

Di Russo, F., Berchicci, M., Bianco, V., Mussini, E., Perri, R. L., Pitzalis, S., ... & Spinelli, D. (2021). Sustained

visuospatial attention enhances lateralized anticipatory ERP activity in sensory areas. *Brain Structure and Function*, 226(2), 457–470.

Di Russo, F., Berchicci, M., Bianco, V., Perri, R. L., Pitzalis, S., & Mussini, E. (2021). Modulation of anticipatory visuospatial attention in sustained and transient tasks. *Cortex*, *135*, 1–9.

Ding, Y., Martinez, A., Qu, Z., & Hillyard, S. A. (2014). Earliest stages of visual cortical processing are not modified by attentional load. *Human Brain Mapping*, *35*(7), 3008–3024.

Doallo, S., Lorenzo-Lopez, L., Vizoso, C., Holguín, S. R., Amenedo, E., Bará, S., & Cadaveira, F. (2005). Modulations of the visual N1 component of event-related potentials by central and peripheral cueing. *Clinical Neurophysiology*, *116*(4), 807-820.

Eimer, M. (1994). "Sensory gating" as a mechanism for visuospatial orienting: Electrophysiological evidence from trial-by-trial cuing experiments. *Perception & Psychophysics*, *55*(6), 667–675.

Eimer, M. (2014). The time course of spatial attention: insights from event-related brain potentials. *The Oxford handbook of attention*, *1*, 289–317.

Elisa Martín-Arévalo, Chica, A. B., & Juan Lupiáñez. (2015). No single electrophysiological marker for facilitation and inhibition of return: a review. *Behavioural Brain Research*, *300*, 1–10.

Erel, H., & Levy, D. A. (2016). Orienting of visual attention in aging. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *69*, 357–380.

Feldmann, W. T., & Vogel, E. K. (2018). Neural evidence for the contribution of active suppression during working memory filtering. *Cerebral Cortex*, *29*(2), 529–543.

Foster, J. J., & Awh, E. (2019). The role of alpha oscillations in spatial attention: limited evidence for a suppression account. *Current opinion in psychology*, *29*, 34–40.

Foxe, J. J., & Snyder, A. C. (2011). The role of alpha-band brain oscillations as a sensory suppression mechanism during selective attention. *Frontiers in psychology*, *2*, 154.

Gaspar, J. M., Christie, G. J., Prime, D. J., Jolicœur, P., & McDonald, J. J. (2016). Inability to suppress salient distractors predicts low visual working memory capacity. *Proceedings of the National Academy of Science*, *113*(13), 3696–3698.

Gazzaley, A., Clapp, W., Kelley, J., McEvoy, K., Knight, R. T., & D' Esposito, M. (2008). Age-related top-down suppression deficit in the early stages of cortical visual memory processing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(35), 13122–13126.

Geerligs, L., Saliasi, E., Maurits, N. M., & Lorist, M. M. (2012). Compensation through increased functional connectivity: Neural correlates of inhibition in old and young. *Journal of cognitive neuroscience*, *24*(10), 2057–2069.

Geerligs, L., Saliasi, E., Maurits, N. M., Renken, R. J., & Lorist, M. M. (2014). Brain mechanisms underlying the effects of aging on different aspects of selective attention. *NeuroImage*, *91*, 52–62.

Gould, I. C., Rushworth, M. F., & Nobre, A. C. (2011). Indexing the graded allocation of visuospatial attention using anticipatory alpha oscillations. *Journal of Neurophysiology*, *105*(3), 1318–1326.

Grady, C. L. (2017). Age differences in functional connectivity at rest and during cognitive tasks. In R. Cabeza, L. Nyberg & D. C. Park (Eds.), *Cognitive neuroscience of aging: Linking cognitive and cerebral aging* (2nd ed., pp. 105–130). New York, the United States of America: Oxford University Press.

Guilbert, A., Clément, S., & Moroni, C. (2019). Aging and orienting of visual attention: Emergence of a rightward attentional bias with aging? *Developmental Neuropsychology*, *44*(3), 310–324.

Haring, A. E., Zhuravleva, T. Y., Alperin, B. R., Rentz, D. M., Holcomb, P. J., & Daffner, K. R. (2013). Age-related differences in enhancement and suppression of neural activity underlying selective attention in matched young and old adults. *Brain Research*, *1499*, 69–79.

Heideman, S. G., Rohenkohl, G., Chauvin, J. J., Palmer, C. E., van Ede, F., & Nobre, A. C. (2018). Anticipatory neural dynamics of spatial-temporal orienting of attention in younger and older adults. *NeuroImage*, *178*, 46–56.

Hillyard, S. A., & Münte, T. F. (1984). Selective attention to color and location: An analysis with event-related brain potentials. *Perception & Psychophysics*, *36*(2), 185–198.

Hong, X., Sun, J., Bengson, J. J., Mangun, G. R, & Tong, S. (2015). Normal aging selectively diminishes alpha lateralization in visual spatial attention. *NeuroImage*, *106*, 353–363.

Hopfinger, J. B., & Mangun, G. R. (1998). Reflexive attention modulates processing of visual stimuli in human extrastriate cortex. *Psychological science*, *9*(6), 441–447.

Hopfinger, J. B., & Mangun, G. R. (2001). Tracking the influence of reflexive attention on sensory and cognitive processing. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *1*(1), 56–65.

Kenemans, J. L., Smulders, F. T. Y., & Kok, A. (1995). Selective processing of two-dimensional visual stimuli in young and old subjects: Electrophysiological analysis. *Psychophysiology*, *32*(2), 108–120.

Klimesch, W. (2012). Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in*

cognitive sciences, *16*(12), 606–617.

Lavie, N. (2005). Distracted and confused? Selective attention under load. *Trends in cognitive sciences*, *9*(2), 75–82.

Learmonth, G., Benwell, C. S. Y., Thut, G., & Harvey, M. (2017). Age-related reduction of hemispheric lateralization for spatial attention: An EEG study. *NeuroImage, 153*, 139–151.

Leenders, M. P., Lozano-Soldevilla, D., Roberts, M. J., Jensen, O., & De Weerd, P. (2018). Diminished alpha lateralization during working memory but not during attentional cueing in older adults. *Cerebral Cortex*, *28*(1), 21–32.

Li, T., Wang, L., Huang, W., Zhen, Y., Zhong, C., Qu, Z., & Ding, Y. (2020). Onset time of inhibition of return is a promising index for assessing cognitive functions in older adults. *The Journals of Gerontology: Series B*, *75*(4), 753–761.

Lorenzo-López, L., Amenedo, E., & Cadaveira, F. (2008). Feature processing during visual search in normal aging: electrophysiological evidence. *Neurobiology of aging*, *29*(7), 1101–1110.

Lorenzo-López, L., Doallo, S., Vizoso, C., Amenedo, E., Holguín, S. R., & Cadaveira, F. (2002). Covert orienting of visuospatial attention in the early stages of aging. *Neuroreport*, *13*(11), 1459–1462.

Luck, S. J., Hillyard, S. A , Mouloua, M., Woldorff, M. G., Clark, V. P., & Hawkins, H. L. (1994). Effects of spatial cuing on luminance detectability: Psychophysical and electrophysiological evidence for early selection. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *20*(4), 887–904.

Luck, S. J., & Kappenman, E. S. (2012). ERP components and selective attention. In S. J. Luck & E. S. Kappenman (Eds.), *The Oxford handbook of event-related potential components* (pp. 295–327). New York, the United States of America: Oxford University Press.

Madden, D. J. (2007). Aging and visual attention. *Current Directions in Psychological Science*, *16*(2), 70–74.

Madden, D. J., Spaniol, J., Bucur, B., & Whiting, W. L. (2007). Age-related increase in top-down activation of visual features. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *60*(5), 644–651.

Madden, D. J., & Monge, Z. A. (2019). Visual attention with cognitive aging. *Oxford Research Encyclopedia of Psychology*, 1–40.

Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. (1991). Modulations of sensory-evoked brain potentials indicate changes in perceptual processing during visual-spatial priming. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *17*(4), 1057–1074.

Mangun, G. R., & Hillyard, S. A (1988). Spatial gradients of visual attention: Behavioral and electrophysiological

evidence. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *70*(5), 417–428.

Mangun, G. R., & Hillyard, S. A (1987). The spatial allocation of visual attention as indexed by event-related brain potentials. *Human Factors*, *29*(2), 195–211.

Mcdonald, J. J., Ward, L. M., & Kiehl, K. A. (1999). An event-related brain potential study of inhibition of return. *Perception & psychophysics*, *61*(7), 1411–1423.

Mathuranath, P. S., Nestor, P. J., Berrios, G. E., Rakowicz, W., & Hodges, J. R. (2000). A brief cognitive test battery to differentiate Alzheimer's disease and frontotemporal dementia. *Neurology*, *55*(11), 1613–1620.

Muiños, M., Palmero, F., & Ballesteros, S. (2016). Peripheral vision, perceptual asymmetries and visuospatial attention in young, young-old and oldest-old adults. *Experimental Gerontology*, *75*, 30–36.

Nagamatsu, L. S., Carolan, P., Liu-Ambrose, T. Y. L., & Handy, T. C. (2011). Age-related changes in the attentional control of visual cortex: A selective problem in the left visual hemifield. *Neuropsychologia*, *49*(7), 1670–1678.

Nagamatsu, L. S., Liu-Ambrose, T. Y. L., Carolan, P., & Handy, T. C. (2009). Are impairments in visual-spatial attention a critical factor for increased falls risk in seniors? An event-related potential study. *Neuropsychologia*, *47*(13), 2749–2755.

Noonan, M. P., Adamian, N., Pike, A., Printzlau, F., Crittenden, B. M., & Stokes, M. G. (2016). Distinct mechanisms for distractor suppression and target facilitation. *Journal of Neuroscience*, *36*(6), 1797–1807.

Oberauer, K. (2019). Working memory and attention—a conceptual analysis and review. *Journal of cognition*, *2*(1), 1–23.

Olk, B., & Kingstone, A. (2014). Attention and ageing: Measuring effects of involuntary and voluntary orienting in isolation and in combination. *British Journal of Psychology*, *106*(2), 235–252.

Rasoulzadeh, V., Sahan, M. I., van Dijck, J. P., Abrahamse, E., Marzecova, A., Verguts, T., & Fias, W. (2021). Spatial attention in serial order working memory: An EEG study. *Cerebral Cortex, 31*(5), 2482–2493.

Sander, M. C., Werkle-Bergner, M., & Lindenberger, U. (2012). Amplitude modulations and inter-trial phase stability of alpha-oscillations differentially reflect working memory constraints across the lifespan. *NeuroImage*, *59*(1), 646–654.

Satel, J., Hilchey, M. D., Wang, Z., Story, R., & Klein, R. M. (2013). The effects of ignored versus foveated cues upon inhibition of return: An event-related potential study. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *75*(1), 29–40.

Schmitz, T. W., Cheng, F. H., & De Rosa, E. (2010). Failing to ignore: paradoxical neural effects of perceptual load

on early attentional selection in normal aging. *Journal of Neuroscience*, *30*(44), 14750–14758.

Schmitz, R., & Peigneux, P. (2011). Age-related changes in visual pseudoneglect. *Brain and cognition*, *76*(3), 382–389.

Sciberras-Lim, E. T., & Lambert, A. J. (2017). Attentional orienting and dorsal visual stream decline: Review of behavioral and EEG Studies. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *9*, 246.

Serences, J. T., & Kastner, S. (2014). A multi-level account of selective attention. In A. C. Nobre & S. Kastner (Eds.), *The Oxford handbook of attention* (pp. 76–104). New York, the United States of America: Oxford University Press.

Talsma, D., Kok, A., & Ridderinkhof, K. R. (2006). Selective attention to spatial and non-spatial visual stimuli is affected differentially by age: Effects on event-related brain potentials and performance data. *International Journal of Psychophysiology*, *62*(2), 249–261.

Tian, Y., Klein, R. M., Satel, J., Xu, P., & Yao, D. (2011). Electrophysiological explorations of the cause and effect of inhibition of return in a cue-target paradigm. *Brain topography*, *24*(2), 164–182.

Tunnermann, J., Petersen, A., & Scharlau, I. (2015). Does attention speed up processing? Decreases and increases of processing rates in visual prior entry. *Journal of Vision, 15*(3), 1–27.

Vaden, R. J., Hutcheson, N. L., McCollum, L. A., Kentros, J., & Visscher, K. M. (2012). Older adults, unlike younger adults, do not modulate alpha power to suppress irrelevant information. *NeuroImage*, *63*(3), 1127–1133.

van der Waal, M., Farquhar, J., Fasotti, L., & Desain, P. (2017). Preserved and attenuated electrophysiological correlates of visual spatial attention in elderly subjects. *Behavioural Brain Research*, *317*, 415–423.

van Moorselaar, D., & Slagter, H. A. (2019). Learning what is irrelevant or relevant: Expectations facilitate distractor inhibition and target facilitation through distinct neural mechanisms. *Journal of Neuroscience*, *39*(35), 6953–6967.

Wang, Y., Fu, S., Greenwood, P., Luo, Y., & Parasuraman, R. (2012). Perceptual load, voluntary attention, and aging: An event-related potential study. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, *84*(1), 17–25.

Wascher, E., & Tipper, S. P. (2004). Revealing effects of noninformative spatial cues: An EEG study of inhibition of return. *Psychophysiology*, *41*(5), 716–728.

Worden, M. S., Foxe, J. J., Wang, N., & Simpson, G. V. (2000). Anticipatory biasing of visuospatial attention indexed by retinotopically specific α-bank electroencephalography increases over occipital cortex. *Journal of*

Neuroscience, *20*(6), 1–6.

Yamaguchi, S., Tsuchiya, H., & Kobayashi, S. (1995). Electrophysiologic correlates of visuo-spatial attention shift. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, *94*(6), 450–461.

Zanto, T. P., Hennigan, K., Östberg, M., Clapp, W. C., & Gazzaley, A. (2010). Predictive knowledge of stimulus relevance does not influence top-down suppression of irrelevant information in older adults. *Cortex*, *46*(4), 564–574.

Zanto, T. P., Toy, B., & Gazzaley, A. (2010). Delays in neural processing during working memory encoding in normal aging. *Neuropsychologia*, *48*(1), 13–25.

Zanto, T. P., & Gazzaley, A. (2014). Attention and ageing. In A. C. Nobre & S. Kastner (Eds.), *The Oxford handbook of attention* (pp. 927–971). New York, the United States of America: Oxford University Press.

Zanto, T. P., & Gazzaley, A. (2017). Selective attention and inhibitory control in the aging brain. In R. Cabeza, L. Nyberg, & D. C. Park (Eds.), *Cognitive neuroscience of aging: Linking cognitive and cerebral aging* (pp. 207–234). New York, the United States of America: Oxford University Press.

Zhuravleva, T. Y., Alperin, B. R., Haring, A. E., Rentz, D. M., Holcomb, P. J, & Daffner, K. R. (2014). Age-related decline in bottom-up processing and selective attention in the very old. *Journal of Clinical Neurophysiology: Official Publication of the American Electroencephalographic Society*, *31*(3), 261–271.

Influence of normal aging on early stages of visual attention: Evidence from ERP studies

YE Liqun, TAN Xin, YAO Kun, DING Yulong

(School of Psychology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: Selective attention modulates multiple stages of visual processing, and nearly all the attentional modulations are affected by normal aging. Studies about the influence of aging on early stages of attentional processing can greatly help to understand the mechanism of cognitive aging. This paper systematically reviews the ERP (event-related potential) studies investigating the aging effect on both pre-stimulus anticipatory attention and sensory stages of attentional processing (less than 200ms post-stimulus). Current evidence shows that: (1) early attentional effects reflected by many ERP components (e.g., ADAN and EDAN reflecting anticipatory attention, N1 reflecting early spatial attention, SP and SN reflecting early feature attention) are delayed in older adults compared to young adults; (2) the amplitudes of early attentional effects showed diverse age-related patterns in different ERP components: while some components (e.g., ADAN, EDAN, and P1 reflecting early spatial attention) appear to be resistant to aging, some other components (e.g., alpha power lateralization reflecting anticipatory attention, N1 reflecting early spatial attention, and SN reflecting early feature attention) seem to be influenced easily by aging, albeit some inconsistent results; (3) while target facilitation reflected by some ERP components (e.g., SP reflecting early feature attention, P1 and N1 reflecting early object attention) is retained in healthy older adults, there is an age-related decline in distractor suppression. Regarding to the diverse and inconsistent findings about how normal aging affects early attentional effects in ERP amplitudes, it might be due to task demands, different attentional processes (distractor suppression vs. target facilitation) engaged in different studies, and/or individual differences in older adults across studies. Future research should control these confounding factors to obtain stable and comparable results, and manipulate these factors to explore their specific effects on early stages of attention to further understand the aging mechanism.

Keywords: early stages of visual attention, normal aging, anticipatory attention, ERP